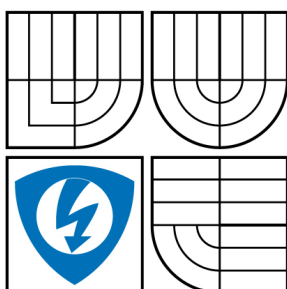


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SYSTÉM PRO STABILIZACI TEPLoty

TEMPERATURE STABILIZATION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

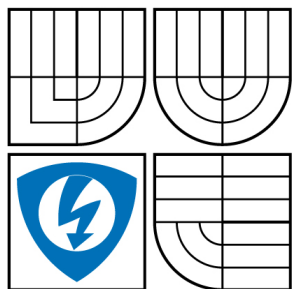
JAROSLAV STRAPKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KADLEC, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Strapko Jaroslav

ID: 77746

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Systém pro stabilizaci teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vytvořte zařízení pro stabilizaci teploty libovolného systému pomocí Peltiérového článku řízené mikrokontrolerem s implementovanou funkcí pro automatické nalezení regulačních konstant a výpočtem mezí teplotní stabilizace daného systému. Vytvořené zařízení musí být zcela autonomní s vhodně koncipovaným ovládáním pro nastavení požadované teploty a jednotlivých pracovních režimů. Součástí tohoto projektu je i programové vybavení mikrokontroléru. Výsledná diplomová práce bude obsahovat přiložené CD s Vámi vytvořenými zdrojovými kódy pro mikrokontrolér.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jaroslav Strapko
Bytem: Pod Hájom 1090/64, 01841, Dubnica nad Váhom
Narozen/a (datum a místo): 30.11.1985, Ilava

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Ing. Zdenka Rozsivalová

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Systém pro stabilizaci teploty

Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Predkladaná práca sa zaoberá vytvorením zariadenia pre stabilizáciu teploty ľubovoľného systému pomocou Peltierovho článku riadeného mikrokontrolérom s implementovanou funkciou pre automatický výpočet regulačných konštánt. Zariadenie je autonómne s vhodne navrhnutým ovládaním pre nastavenie požadovanej teploty a jednotlivých pracovných režimov pre ovládanie Peltierovho článku.

Abstract:

This work deals with analyzing and application of system for temperature stabilization of arbitrary system with Peltier module. The modul is driven by microcontroler with implemented function for automatic calculation of regulation constants. The system for temperature stabilization is fully independent and easy to control required temperature and operating mode for Peltier module control.

Klíčová slova:

Peltierov článok, stabilizácia teploty, regulačné konštanty, PID regulátor, riadenie Peltierovho článku, prechodová charakteristika, jednotkový skok.

Keywords:

Peltier module, temperature stabilization, regulation constants, PID regulator, driving of Peltier module, unit function response, unit step function.

Bibliografická citácia diela:

STRAPKO, J. *Systém pro stabilizaci teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 39 s. 2. příl. Vedúci bakalárskej práce Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela:

Prehlasujem, že som túto vysokoškolskú kvalifikačnú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, zvlášť som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 29. 5. 2008

.....

PodĎakovanie:

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jaroslavovi Kadlecovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc pri spracovaní bakalárskej práce.

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor: Jaroslav Strapko

Název závěrečné práce: Systém pro stabilizaci teploty

Název závěrečné práce ENG: Temperature stabilization system

Anotace závěrečné práce: Predkladaná práca sa zaoberá vytvorením zariadenia pre stabilizáciu teploty ľubovlného systému pomocou Peltierovho článku riadeného mikrokontrolérom.

Anotace závěrečné práce ENG: This work deals with analyzing and application of system for temperature stabilization of arbitrary system with Peltier module driven by microcontroller.

Klíčová slova: Peltierov článok, stabilizácia teploty, regulačné konštanty, PID regulátor, riadenie Peltierovho článku, prechodová charakteristika, jednotkový skok

Klíčová slova ENG: Peltier module, temperature stabilization, regulation constants, PID regulator, driving of Peltier module, unit function response, unit step function

Typ závěrečné práce: bakalářská práce

Datový formát elektronické verze: pdf

Jazyk závěrečné práce: slovenština

Přidělovaný titul: Bc.

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav / ateliér: Ústav mikroelektroniky

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Studijní obor: Mikroelektronika a technologie

OBSAH

1	Úvod.....	- 8 -
2	Teoretický úvod	- 9 -
2.1	Peltiérovo článok	- 9 -
2.2	PID regulátor.....	- 10 -
3	Riadenie	- 12 -
3.1	Napájací blok	- 12 -
3.2	CPU.....	- 12 -
3.3	Supervízor	- 14 -
3.4	Obvod klávesnice.....	- 15 -
3.5	Zobrazovacia časť	- 16 -
3.6	Komunikácia s PC.....	- 17 -
3.7	Vstupno-výstupné rozhranie	- 18 -
4	Výkonová časť s meraním teploty	- 19 -
4.1	Obvod logických prvkov.....	- 19 -
4.2	Výkonové tranzistory	- 20 -
4.2.1	Výpočet chladiča pre tranzistory	- 21 -
4.3	Obvod pre meranie teploty.....	- 22 -
5	Návrh PID regulátora.....	- 25 -
5.1	Výpočet parametrov regulátora.....	- 26 -
5.1.1	Určenie konštánt t_n , t_u , K	- 26 -
5.1.2	Výpočet parametrov K_p , T_i , T_d	- 28 -
5.1.3	Prepočet spojitého PID regulátora na diskretný PSD regulátor.....	- 29 -
6	Merania	- 32 -
7	Záver	- 36 -
8	Zoznam použitej literatúry	- 37 -
9	Zoznam príloh.....	- 39 -

1 Úvod

Systém pre stabilizáciu teploty je autonómny systém pre regulovanie sústavy na požadovanú teplotu v určitom rozsahu. Práca sa zaoberá jeho návrhom, zostavením, oživením a meraniami, ktoré sú s ním spojené.

Je rozdelená do štyroch častí. V časti riadenie sa zaoberá problematikou zostavenia hardvéru, ktorý dokáže spracovať analógový signál. Tento signál je výstupom sústavy, ktorú regulujeme. Rieši komunikáciu s okolím. Jedná sa napr. o zadávanie parametrov pomocou tlačidiel ako požadovaná teplota alebo parametre PID regulátora, ktoré dokáže realizované zariadenie vypočítať, preto ich zadávanie nie je potrebné. Komunikácia s okolím zahŕňa aj zobrazovanie výsledkov na displayi.

Časť výkonových prvkov s meraním teploty sa podrobnejšie zaoberá správnym spínaním výkonových tranzistorov, pomocou ktorých sa reguluje správna veľkosť prechádzajúceho prúdu cez Peltierov článok. Meranie teploty je realizované prevodom na elektrickú veličinu, v tomto prípade na meranie napätia.

Tretia časť sa zaoberá výpočtom konštánt a parametrov navrhovaného PID regulátora. Opisuje použitú metódu, z ktorej sa vychádza pri počítaní konštánt, jednotlivé prevody medzi PID a PSD regulátorom. Dané opisované metódy sú zahrnuté v softvéri.

Posledným krokom práce sú merania, ktoré prebehli na dvoch rôznych miestach s odlišnými podmienkami okolia so zhodnotením výsledkov.

2 Teoretický úvod

2.1 Peltierov článok

Je to polovodičový prvok, pracujúci na fyzikálnom princípe, ktorý objavil pán Peltier pred 150 rokmi. Ak privedieme napätie na póly takého článku, začne sa na jednej strane zahrievať a na druhej naopak ochladzovať. Termoelektrický modul (TE chladič) alebo Peltierov článok je polovodičový prvok, ktorý funguje ako malé tepelné čerpadlo. Po pripojení nízkonapäťového zdroja na Peltierov článok začne teplo prechádzať z jednej strany článku na druhú. Tým pádom sa jedna strana modulu začne ochladzovať, kým druhá sa začne zahrievať. Je dôležité spomenúť, že tento proces môže byť obrátený a pomocou Peltierových článkov sa dá získať elektrický prúd alebo po zmene polarít je možné zmeniť smer prechodu tepla cez článok. Takže Peltierov článok sa dá použiť na chladenie, ohrev aj výrobu elektrického prúdu.

Na rozdiel od obyčajného chladiča je možné pomocou Peltierového článku ochladiť objekt pod teplotu okolia a tiež stabilizovať teplotu objektov, ktoré sú vystavené veľkému výkyvu teploty prostredia. Termoelektrický článok je aktívnym prvkom na rozdiel od chladiča, ktorý zabezpečuje len pasívne chladenie. Termoelektrické články sú vo všeobecnosti vhodné pre aplikácie, ktoré vyžadujú odvod tepla rádovo od jednotiek miliwattu až po niekoľko tisíc wattov.

Výhody Peltierových článkov:

- žiadne pohyblivé časti
- malé rozmery a nízka váha
- pomerne robustná konštrukcia
- nevyžaruje žiadny hluk ani EMI
- zabezpečuje zároveň ohrev aj chladenie
- bezúdržbová prevádzka
- široký rozsah pracovnej teploty
- nízke napájacie napätie
- lokálne chladenie
- pracuje v ľubovoľnej polohe
- pracuje aj pri vysokých preťaženiach
- nezaťažuje životné prostredie

Oblasti použitia:

- v leteckom, automobilovom priemysle
- vojenský priemysel, ponorky, riadené strely
- kompaktné výmenníky tepla
- chladenie nápojov
- chladenie elektronických prvkov (hlavne výkonných procesorov)
- infračervené detektory
- nízkošumové zosilňovače
- chladiče laserových diód
- malé chladiace boxy
- infračervené senzory
- laboratórne chladiace zariadenia

2.2 PID regulátor

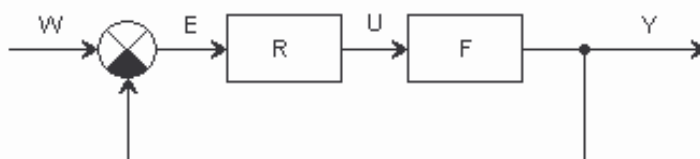
Reguláciou sa obecnne myslí automatická regulácia veľkosti niektorej fyzikálnej veličiny ako napríklad teplota, tlak, vlhkosť, apod. Základným princípom každej regulácie je spätná väzba, ktorá sprostredkuje regulátoru spätnú informáciu o veľkosti regulovanej veličiny. Spätná väzba môže byť realizovaná akokoľvek, napr. pomocou obsluhy alebo automaticky, pomocou vhodného čidla. Regulátor potom získava pomocou čidla spätnú informáciu o skutočnej veľkosti regulovanej veličiny, túto hodnotu porovnáva s požadovanou a pomocou tzv. akčného člena sa potom snaží doceliť požadovanej hodnoty regulovanej veličiny. Existuje spojitá a nespojitá regulácia. PID regulácia spadá pod reguláciu spojitú. To znamená že regulátor dokáže meniť požadovanú veličinu spojitou (plynulo od 0 do 100 %).

PID regulácia – názov sa skladá z troch písmen , ktoré sú odvodené od začiatočných písmieniek jednotlivých zložiek regulácie:

P – proporcionálna zložka

I – integračná zložka

D – derivačná zložka



Obr.1: Schéma regulačného obvodu [8]

Na obr.1 je znázornený regulačný obvod tvorený regulovanou sústavou F a regulátorom R.

W – žiadaná veličina

E – regulačná odchýlka

U – akčný zásah

Y – regulovaná veličina

Regulačná odchýlka E predstavujúca rozdiel požadovanej hodnoty W na výstupe od aktuálnej (vypočítaná zo spätnej väzby) je vstupom do troch samostatných blokov (obvodov) P, I, D obsiahnutých v bloku R a po spracovaní sa potom tieto zložky znovu sčítajú do akčného zásahu U. Potom je vzorec zásahu $u(t)$ nasledovný:

$$u(t) = P + I + D, \quad (1)$$

kde

$$P = K_p e(t), \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$D = T_d \frac{de}{dt}, \quad (4)$$

kde

$$e(t) = W - \text{Meranie}(t), \quad (5)$$

je odchýlka, a K_p , T_i , T_d sú konštanty používané k ladeniu regulačného obvodu.

K_p je proporcionálna konštanta – vyššia hodnota K_p znamená rýchlejšiu časovú odozvu pri zväčšenej odchýlke.

T_i je integračná konštanta - menšia hodnota T_i naznačuje ustálený stav a odchýlka alebo porucha je eliminovaná rýchlejšie.

T_d je derivačná konštanta - vyššia hodnota T_d znižuje presah, ale spomaľuje časovú odozvu.

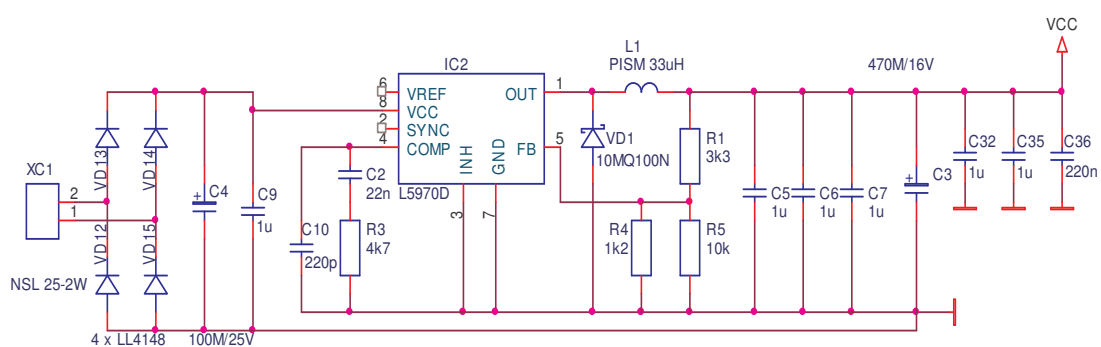
Správne nastavenie parametrov PID regulátorov je komplikovaný proces.

3 Riadenie

3.1 Napájací blok

Napájací blok predstavuje obr.2, ktorého hlavnou časťou je L5970D [2]. Jeho použitie je rozsiahle. Používa sa v autorádiách, LCD monitoroch, modemoch, DC-DC moduloch, nabíjačkách v PC elektronike a mnohých ďalších elektronických zariadeniach. L5970D je znižovací, spínací, výkonový regulátor, ktorý je schopný na výstupe dodať prúd 1A a napätie od 1,235V až do 35V. Napájacie napätie sa môže pohybovať v rozmedzí 4,4V až 36V.

Na vstupe napájacieho bloku je usmerňovač a filtračné kondenzátory C4, C9 pre zabezpečenie polarity napájacieho napätia, teda napájacie napätie nemusí byť iba jednosmerného charakteru. Tým pádom sa doska stáva použiteľnou aj pre iné aplikácie. Pre dané riešenie bude napájacie napätie 12V a na výstupe napájacieho bloku sa nastaví napätie 5V odporami R1, R4, R5 pre napájanie ďalších častí obvodu ako mikroprocesor, display, latch obvody, obvody pre I2C komunikáciu a iné. Keďže integrovaný obvod pracuje so spínacou frekvenciou 250 kHz na filtráciu stačia keramické kondenzátory malej kapacity C5, C6, C7, ktoré sú kvalitou podstatne lepšie t.j. majú menší sériový odpor (ESR) ako elektrolytické. C3 slúži na vykrytie dlhších výpadkov napájania.



Obr.2: Napájací blok

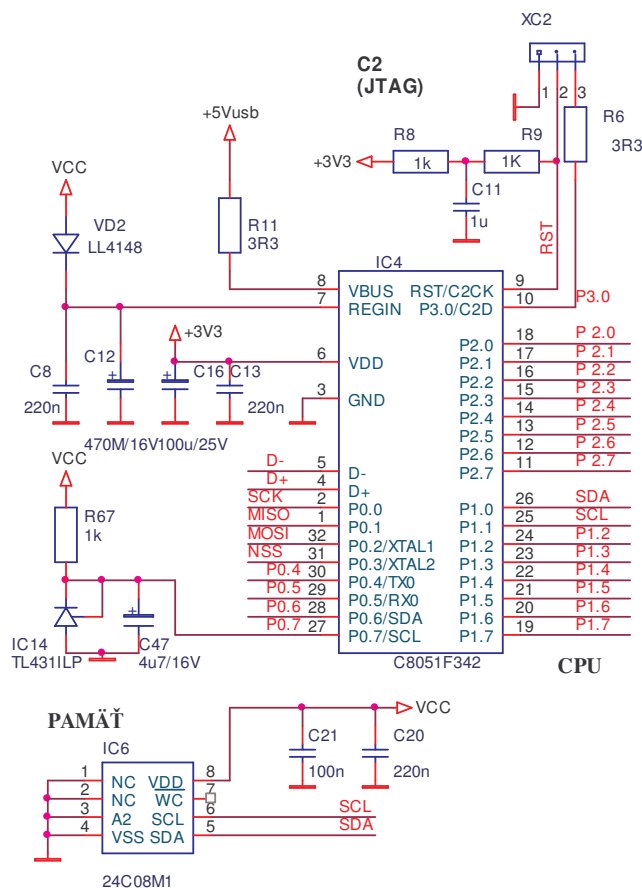
3.2 CPU

Celé jadro systému tvorí mikroprocesor C8051F342, ktorého parametre sú:

- 10 bit ADC
- 2 komparátory

- vnútorná napäťová referencia 2,4V
- digitálne periférne zariadenia : SPI, UART rozhranie, SMBus, 25 I/O portov
- napäťový regulátor
- pracovné napätie 2,7V – 5,25V , obyčajne 3,3V
- pamäť : 64 kb Flash, 4352 bytes RAM
- vnútorný oscilátor, vonkajší oscilátor (RC, C, kryštál ...)
- vysokorýchlostné jadro : až do 48 MIPS

Poradie pinov je dané multiplexorom, ktorý postupne zapĺňa brány od P0.0 až k P2.7. Využitie sú takmer všetky formy rozhraní, pomocou ktorých dokáže C8051F342 komunikovať s okolím. Obvod tvorený R67, IC14, C47 na obr.3 tvorí vonkajšiu napäťovú referenciu. Je nastavená na 2,5V a to z toho dôvodu, že vnútorná napäťová referencia 2,4V C8051F342 je menej presná. Vonkajšia napäťová referencia 2,5V je presnejšia s toleranciou $\pm 0,4\%$. Širšie využitie možností procesora umožňuje obvod 24C08M1 od STMicrotechnologies s napájaním v rozsahu od 3V do 5,5V. Slúži ako pamäť mikroprocesora. Slúži aj na čítanie aj zápis informácií. Zapojenie je realizované podľa katalógového listu ako u predošlých obvodov. Je to typ pamäte EEPROM - elektronicky programovateľná pamäť. Využíva I2C zbernicu. Vývod WC umožňuje uzamknúť údaje v pamäti pripojením na zem.



Obr.3: Mikroprocesor a EEPROM

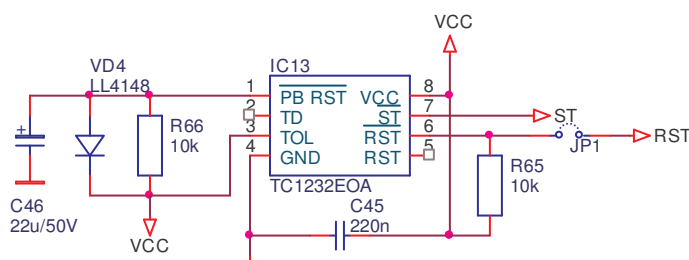
3.3 Supervízor

TC1232 na obr.4 monitoruje správnu funkciu procesora a aj napájacie napätie úrovne 5V. Je používaný tak ako v počítačoch tak aj v automobilových systémoch atď. Funkciu procesora overuje na základe impulzov vysielaných jedným pinom procesora. Tieto impulzy musia byť vytvárané softvérom. Ako náhle procesor nevyšle impulz do určitej doby nastavenej stavom pinu TD, bude procesor cyklicky resetovaný. Pin TD umožňuje nastaviť podľa dokumentácie [3] tri časy:

- 120ms (TD zapojený na GND)
- 600ms (TD nezapojený)
- 1200ms (TD zapojený na VCC)

RST sa uvedie do aktívneho režimu a spôsobí reset aj pri poklese napájacieho napätia 5V na úroveň 4,5V nastavenej pinom TOL. Po opätovnom povolení chodu procesora,

uvoľnením pinu RST, musí procesor vyslať impulz do času nastaveným pinom TD. Podmienkou odblokovania pinu RST je korektné napájacie napätie. Po pripojení napájacieho napätia TC1232 spôsobí, že mikroprocesor zostane v resetovacom stave po dobu približne 500 ms, ktorá je určená súčiastkami C46, VD4, R66. Zabezpečí sa tak správna činnosť obvodu pri nekorektnom napájacom napätí. Takýto stav najčastejšie nastáva pri napájaní z impulzných zdrojov, ktoré majú tendenciu rázovať.

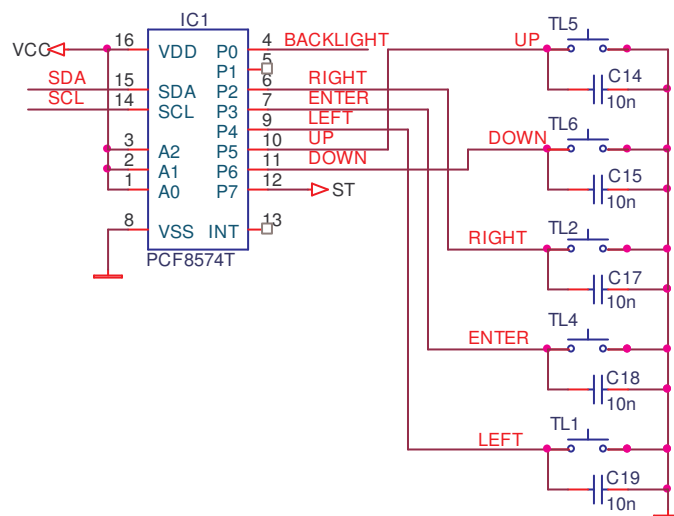


Obr.4: Supervízor

3.4 Obvod klávesnice

Je realizovaný pomocou piatich tlačidiel pripojených k obojsmernému prevodníku PCF8574T paralelnej zbernice na I2C. PCF8574T na obr.5 je rozširujúci obvod mikroprocesora komunikujúci s mikroprocesorom prostredníctvom dvoch signálov : SCL (serial clock line) a SDA (serial data line). Na to, aby mikroprocesor vedel, s ktorým z oboch obvodov komunikuje, slúžia adresové vstupy A0, A1, A2 daného obvodu. U prvého obvodu, slúžiaceho na ovládanie tlačidiel je adresa nastavená na 1 1 1 (adresové vstupy pripojené na napájacie napätie). U ďalšieho obvodu, použitého v ďalšej časti, je nastavená na 0 0 0 (adresové vstupy pripojené na zem). Oba signály SCL a SDA musia byť pripojené cez posilovacie odpory na napájacie napätie. V tomto prípade sú to odpory R61 a R62 na obr.8.

Tlačidlá budú mať funkcie hore, dole, doľava, doprava a posledné bude plniť funkciu výberového a potvrdzovacieho tlačidla Enter. Konštrukčne je to riešené tak, ak užívateľ stlačí požadované tlačidlo, spoja sa vývody obvodu PCF8574T vodivo so zemou. Tento stav je periodicky čítaný mikroprocesorom cez I2C zbernicu, kde sa vyhodnocuje stav tlačidiel. Pri stlačení vznikajú zákmyty, ktoré sú nežiaduce a daná požiadavka od užívateľa môže byť nespracovaná, systém nedokáže správne vyhodnotiť, či došlo alebo nedošlo k stlačeniu tlačidla. Tomuto problému je potrebné sa vyhnúť paralelným pripojením kondenzátorov k jednotlivým tlačidlám, ktoré ošetria nežiaduce zákmyty a zabezpečia správny chod obvodu klávesnice na obr.5.



Obr.5: Blok klávesnice

3.5 Zobrazovacia časť

Pre zobrazenie výsledkov ako aj pre optickú kontrolu pri jednotlivých operáciach, napr. zadávaní požiadavkov slúži LCD display a aj časť obvodu s tromi LED diódami na obr.6. LED diódy signalizujú stavy pracovného režimu zariadenia. Zelená signalizuje činnosť systému, t.j. systém práve stabilizuje teplotu sústavy na požadovanú teplotu. Oranžová signalizuje nastavenie výstupnej teploty. Svieti ak sa stabilizovaná teplota pohybuje v definovanom rozsahu od žiadanej hodnoty. Červená signalizuje poruchový stav. Nastavenie odporov R43, R44, R45 je odvodené v [4]. Display EA DOGM162 je použitý kvôli jeho malým rozmerom , napájaciemu napätiu, spoľahlivosti, nastaviteľnosti niektorých parametrov.

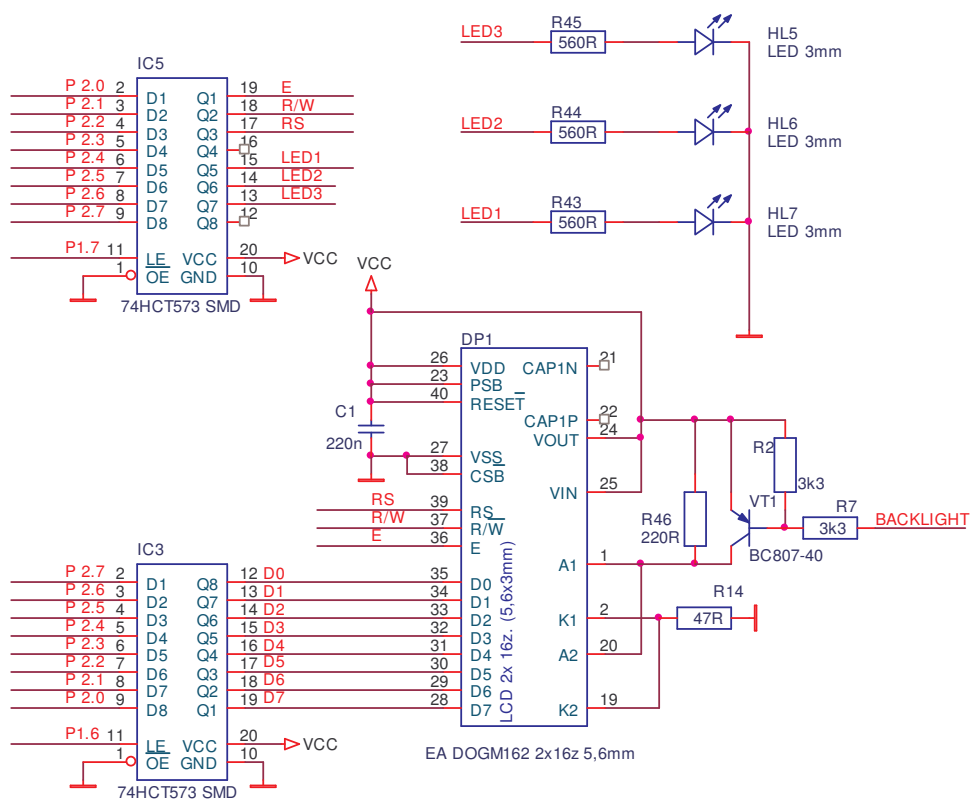
Parametre:

- napájanie 5 V alebo 3,3 V
- 2-riadkový
- max. 16 znakov v riadku
- veľkosť písma 5,6 mm
- 8-dátových vstupov
- nastaviteľné podsvietenie a jas

Napájacie napätie pre display je také isté ako pre všetky ostatné obvody 5V. Podľa zapojenia v katalógovom liste [5] je možná komunikácia pomocou 4-bitového vstupu, 8-bitového vstupu alebo SPI rozhrania. Pri nastavovaní podsvietenia alebo jas display-a nikdy

nesmie nastať stav, pri ktorom sa na vývody nastavujúce tieto parametre privedie plné napájacie napätie. Preto vhodným nastavením odporov R46 a R14 je možné zabrániť tomuto stavu. Signál BACKLIGHT bude aktívny pri úrovni logickej nuly. Preto je použitý PNP tranzistor. Na display-i sú k nastaveniu podsvietenia a jasu použité vývody A1, A2, K1, K2.

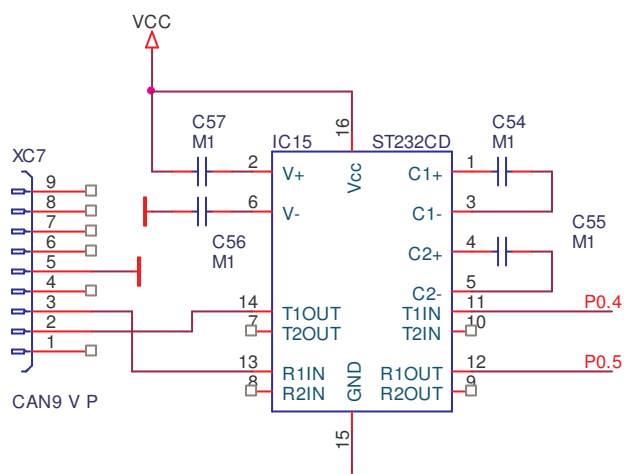
K zobrazovacej časti patria aj dva latch obvody 74HCT573. Rozširujú vstupy alebo výstupy mikroprocesora čo dokazuje aj dokumentácia [6]. Sú použité dva obvody. Jeden je len pre posielanie dát do display-a a druhý je pre riadenie display-a a LED diód. Každý z týchto latch obvodov má pin LE pripojený na iný výstup mikroprocesora. Tým je možné vyberať práve jeden latch obvod. Brána P2 je spoločná pre oba obvody.



Obr.6: Zobrazovacia časť

3.6 Komunikácia s PC

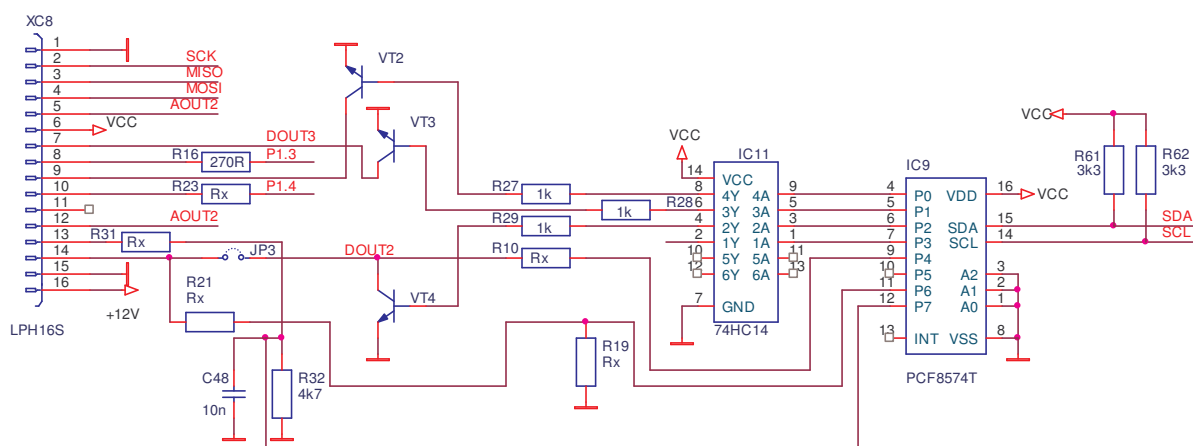
Obvod ST232CD slúži na prevod logických úrovní z procesorovej 3,3V logiky na rozhranie RS232. Samotný komunikačný protokol zabezpečuje procesor. Tým je vyriešená otázka spracovania parametrov stabilizácie teploty cez počítač. Na obr.7 je štandardné zapojenie s obvodom ST232CD.



Obr.7: Obvod pre komunikáciu s PC

3.7 Vstupno-výstupné rozhranie

Táto časť je vytvorená hlavne pre komunikáciu s inými časťami zariadenia, ktoré nie sú obsiahnuté v časti riadenie. V tomto prípade je hlavnou úlohou komunikácia s výkonovou časťou, pre posielanie signálov PWM a CH/Z a pre prijímanie signálu, ktorý spracováva mikroprocesor. Pre komunikáciu je použitý ten istý typ obvodu využívajúci I2C komunikáciu PCF8574T.



Obr.8: Vstupno-výstupné rozhranie

4 Výkonová časť s meraním teploty

V tejto časti práce je riešená problematika výkonového riadenia Peltierovho článku a obvodu pre snímanie teploty. Výkonová časť je rozdelená do dvoch blokov pre lepšie vysvetlenie jej funkcie. Prvou je obvod logických prvkov pre správne spínanie výkonových tranzistorov, aby sa náhodou nestalo, že tranzistory budú súčasne otvorené a spôsobia haváriu prípadne poškodenie celého zariadenia a druhou je obvod samotných výkonových tranzistorov pre regulovanie prechádzajúceho prúdu Peltierovým článkom a jeho správne využitie. Samotná regulácia spočíva v správnom využití dvoch signálov vyslaných procesorom. Sú to signály CH/Z pre zaistenie ohrevu alebo chladenia a signál PWM pre riadenie veľkosti tepelnej výmeny.

4.1 Obvod logických prvkov

Zaoberá sa správnym spínaním výkonových prvkov a tým aj smerom prechodu tepla cez článok. Je potrebné vytvoriť funkciu, ktorá zabezpečí, že tranzistory VT1 a VT2 nemôžu byť zopnuté naraz - VT1 zopnutý a VT2 v blokovačom stave alebo naopak. Tiež je nevyhnutné zamedziť tomu, aby tranzistory VT1 a VT3 alebo VT2 a VT4 neboli zopnuté naraz kvôli vzniku skratového prúdu. Týmto problémom je možné predísť správnym riadením signálov CH/Z a PWM. Realizovanie zapojenia obvodu logických prvkov a tým zabezpečené správne spínanie tranzistorov je odvodené v [4]. Signálom CH/Z je možné vybrať ohrev alebo chladenie a signálom PWM regulovať čas prechodu prúdu Peltierovým článkom. PWM (Pulse With Modulation) regulátory využívajú zmenu šírky prúdového impulzu, tým sa líšia od obvyčajnej spojitej regulácie prúdu, kde nedochádza len k znižovaniu prúdu ale aj napätia. Pri pulznej regulácii zostáva prúd aj napätie rovnaké, ale mení sa len aktívna doba prechodu prúdu Peltierovým článkom.

Spínanie tranzistorov je zabezpečené obvodmi 74HCT27D a 74HCT14T. 74HCT14T je invertor a 74HCT27D je 3 x 3-vstupový NOR. Vhodnou kombináciou týchto dvoch obvodov a signálov CH/Z a PWM vystupujúcich z obvodu riadenia je možné riadiť výkonové tranzistory. V tab.1 je presný popis ako sa tranzistory otvárajú po príchode signálov CH/Z a PWM. Keďže obvod 74HCT27D je 3-vstupový NOR, do ktorého vstupujú len dva signály CH/Z a PWM, je potrebné zapojiť alebo ošetriť posledný vstup. Na ten je privedený signál charakterizujúci preťaženie. Tento signál je výsledkom komparátora napätí,

ktorý charakterizuje obvod LM258N. Na vstupy sú privedené dve napätia. Na záporný vstup napätie referenčné, ktoré je vytvorené pomocou obvodu TL431ILP(dokáže vytvoriť presnú 2,5V referenciu) a deliča tvoreného rezistormi R7 a R8. Na kladný vstup je privedené snímané napätie na R5. Ak úbytok napätia na R5 bude menší ako nastavená hodnota z deliča, tak výstup komparátora bude logická nula a nijakým spôsobom neovplyvní činnosť ovládania výkonových tranzistorov. Ak úbytok bude väčší, tak komparátor zareaguje, na výstupe sa objaví logická jednotka a obe NOR hradlá sa zablokujú. Tým sa vypnú výkonové tranzistory VT3 a VT4 a bez ohľadu na to, či budú tranzistory VT1 alebo VT2 v aktívnom režime, Peltierovým článkom nepotečie žiadny prúd a zabráni sa tak jeho zničeniu.

PWM	CH/Z	NADP	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
0	0	0	Zat.	Otv.	Otv.	Zat.	Zat.	Otv.
1	0	0	Zat.	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.
0	1	0	Otv.	Zat.	Zat.	Otv.	Otv.	Zat.
1	1	0	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.	Zat.
0	0	1	Zat.	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.
1	0	1	Zat.	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.
0	1	1	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.	Zat.
1	1	1	Otv.	Zat.	Zat.	Zat.	Otv.	Zat.

Tab. 1: Spínanie tranzistorov po príchode signálov CH/Z, PWM a NADP
Zat.- tranzistor je v blokovacom režime , Otv.- tranzistor je otvorený

4.2 Výkonové tranzistory

Túto časť predstavuje predovšetkým šesť výkonových tranzistorov, z ktorých VT1, VT2, VT3, VT4 sú zapojené ako usmerňovací mostík a pracujú vždy vo dvojici. Ostatné dva tranzistory VT5 a VT6 sú využité pre spínanie VT1 a VT2. Tranzistor VT4 pracuje vtedy, ak je otvorený VT1 a tak isto je to aj u kombinácie VT2 a VT3. Pričom VT1 a VT2 sú PNP bipolárne výkonové tranzistory [11] a nimi je možné riadiť, či Peltierov článok bude chladiť alebo zohrievať, teda smer prechodu tepla. VT3 a VT4 sú N-MOS výkonové tranzistory [12], ktoré pracujú podľa toho, ktorý z P-MOS tranzistorov je zopnutý. Pomocou VT3 a VT4 ovládam šírku prúdového impulzu, pretože práve na tieto dva tranzistory je privedený signál PWM. Schéma zapojenia výkonovej časti je v prílohe.

Použitý Peltierov článok má nasledujúce parametre :

$$U_{\max}=17,6 \text{ V},$$

$$I_{\max}=8,5 \text{ A},$$

$$P_{\max}=80 \text{ W},$$

$$\Delta T_{\max}=75^{\circ}\text{C}.$$

Obvod s výkonovými prvkami je realizovaný tak, aby dokázal pracovať v širokej škále využitia Peltierovho článku. Napájacie napätie zariadenia sa môže pohybovať v rozsahu od 6 do 12V a pri návrhu dosky plošných spojov a výbere tranzistorov bolo brané do úvahy, že Peltierovým článkom môže prechádzať prúd až 8A. Pre tieto podmienky by mal byť použitý vypočítaný chladič podľa (13).

4.2.1 Výpočet chladiča pre tranzistory

Podľa [14] sú celkové straty tranzistorov VT3 alebo VT4, spínané s frekvenciou 2,3kHz :

$$P_{VT} = P_{GATE} + P_{OSS} + P_{SP} + P_{VT(on)} \cong 10,4W, \quad (6)$$

kde sú straty na hradle

$$P_{GATE} = Q_G \cdot U_G \cdot f = 25nC \cdot 5V \cdot 2300Hz = 2,875 \cdot 10^{-4}W, \quad (7)$$

kapacitné straty

$$P_{OSS} = \frac{1}{2} \cdot C_{OSS} \cdot U^2 \cdot f,$$

$$P_{OSS} = \frac{1}{2} \cdot 220pF \cdot 12V^2 \cdot 2300Hz = 3,65 \cdot 10^{-5}W, \quad (8)$$

zapínacie a vypínacie straty

$$P_{SP} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot I \cdot (t_{d(on)} + t_{f(off)}) \cdot f,$$

$$P_{SP} = \frac{1}{2} \cdot 12V \cdot 8A \cdot (8,9 + 29)ns \cdot 2300Hz = 4 \cdot 10^{-3}W, \quad (9)$$

a straty v zopnutom stave

$$P_{VT(on)} = U_{CE(on)} \cdot I = 1,3V \cdot 8A = 10,4W. \quad (10)$$

Pre tranzistory VT1 a VT2 sú tiež straty rovnaké. Pri VT1 nebudeme uvažovať straty na hradle, kapacitné straty, zapínacie a vypínacie straty, pretože v nich vystupuje frekvencia, ktorou sú spínané a tá je v tomto prípade veľmi blízka nule ale len straty v zopnutom stave, pretože tie sú buď zopnuté alebo vypnuté podľa toho, či ohrievame alebo chladíme. Potom celkové straty na VT1 alebo VT2 budú podľa (6) až (10):

$$P_{VT} = P_{GATE} + P_{OSS} + P_{SP} + P_{VT(on)} = 0 + 0 + 0 + 3.8 = 24W . \quad (11)$$

Z výkonov určíme tepelný odpor čip-okolie R_{thja} pre maximálnu teplotu čipu $v(j)_{1,2}=150^{\circ}C$ pre VT1 resp. VT2 a $v(j)_{3,4}=175^{\circ}C$ pre VT3 resp. VT4. Maximálna teplota prostredia sa uvažuje $v(a)=60^{\circ}C$. Ešte potrebujeme poznať tepelný odpor čip-púzdro ($R_{thjc}=4,1^{\circ}C/W$ pre VT3,VT4 a $R_{thjc}=0,77^{\circ}C/W$ pre VT1,VT2) a púzdro-chladič (typická hodnota $R_{thcs}=0,5K/W$) podľa [11] a [12]. R_{thja} pre VT1 a VT2 je potom:

$$R_{thja} = \frac{v(j) - v(a)}{P_{VT}} = \frac{150 - 60}{24} = 3,75K/W , \quad (12)$$

a požadovaný tepelný odpor chladiča R_{thra} potom musí byť menší ako

$$R_{thra} = R_{thja} - R_{thjc} - R_{thcs} = 3,75 - 0,77 - 0,5 = 2,48K/W . \quad (13)$$

Pre tranzistory VT3, VT4 vyplýva z (12) $R_{thja} = 10,95 K/W$ a $R_{thra} = 6,35 K/W$.

4.3 Obvod pre meranie teploty

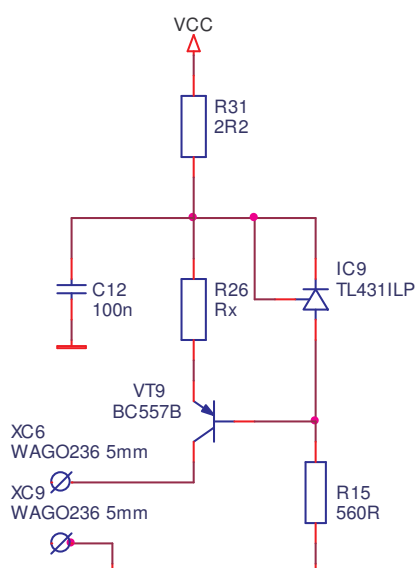
Zvolený je senzor Pt1000. Jedná sa o platínový senzor vytvorený práve pre meranie teploty. Zmena teploty, ktorá je snímaná týmto senzorom je prevádzaná na zmenu elektrického odporu. To znamená meranie hodnoty odporu poskytuje analógové vyjadrenie aktuálnej teploty. Pt1000 určené pre meranie teploty vzduchu sú vyrábané bez prídavných obalov pre skrátenie časovej odozvy senzoru. Ostatné sa zvyčajne vyrábajú v rôznych tubách, podľa toho, v akej sústave merajú teplotu. Tieto senzory môžu merať teplotu v rozsahu od $-200^{\circ}C$ do $+850^{\circ}C$. Najväčšou výhodou týchto senzorov je lineárny priebeh závislosti odporu na teplote v širokom rozsahu teplôt. Tým sa stávajú platínové senzory také využívané a vyhľadávané.

V tejto práci je na meranie teploty použitý Pt1000 v hliníkovom obale. Jedná sa o senzor typu PTC (Positive Temperature Coefficient), t.j. odpor sa zvyšuje v závislosti na teplote. Platínový senzor Pt1000 má pri $0^{\circ}C$ hodnotu odporu 1000Ω . Pri teplote $100^{\circ}C$ je to

1385 Ω . Je lineárny v celom rozsahu týchto teplôt, čo znamená aj jednoduchú kalibráciu hotového zariadenia, pretože sa jedná len o nastavenie parametrov priamky, t.j. smernice k a posunutia q . Kalibrácia zariadenia prebehla v teplotnej komore CTS T-40/25 podľa ortuťového teplomera Labortherm s rozsahom 0-50°C a presnosťou 0,1°C.

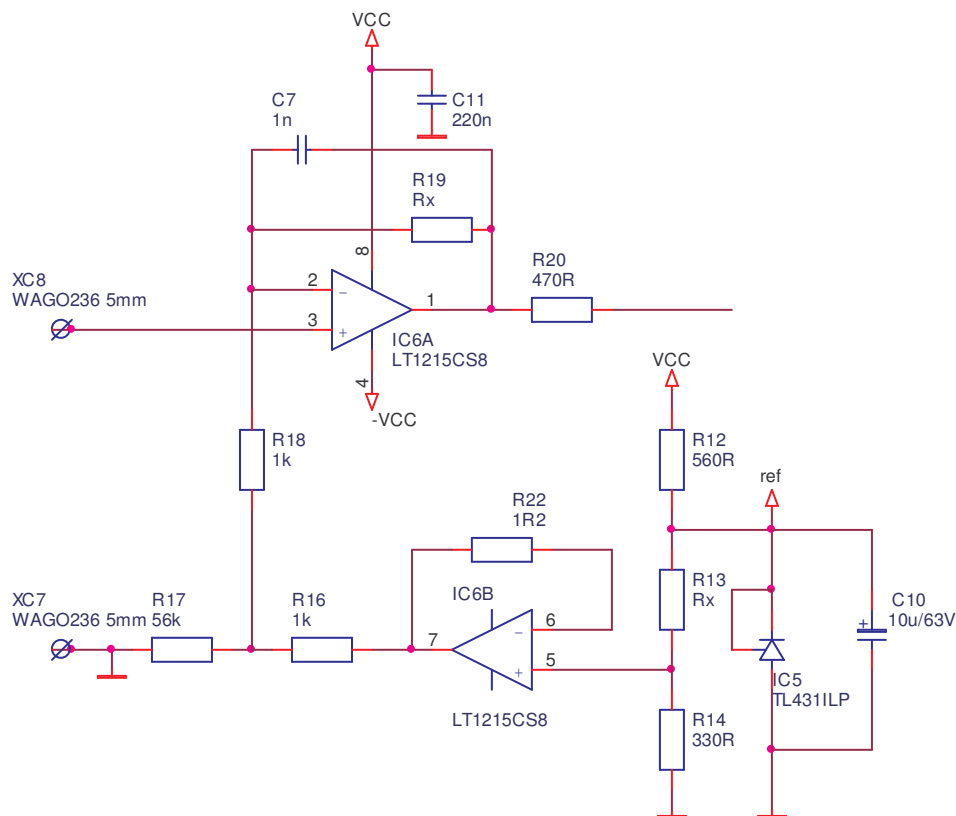
Meranie teploty je pomocou senzoru prevádzané na meranie elektrického odporu a použitým obvodom na obr.10 na meranie napätia. Je to v podstate prevod neelektrickej veličiny na elektrickú (teplota na napätie). Napätie vystupujúce z obvodu pre meranie teploty je vyhodnocované ADC prevodníkom mikroprocesora. Bola uvažovaná ešte jedna možnosť vyhodnocovania teploty. Namiesto napätia by mikroprocesor vyhodnocoval frekvenciu, ktorá by bola výstupom prevodníka napätia na frekvenciu. Táto metóda by bola ale zložitejšia a zdĺhavejšia.

Dôležitou časťou obvodu je prúdový zdroj na obr.9. Pri oživovaní dosky plošných spojov bol nastavený prúd na 1mA. Zdroj je vytvorený pomocou napäťovej referencie TL431ILP. Je stabilný v oblasti využitia rádovo jednotky mA. Hodnota prúdu sa nastavuje odporom R26. Je dôležitý z toho hľadiska, že napätie, ktoré spracováva ADC prevodník sa mení lineárne v závislosti na odpore senzora Pt1000, a tým aj na teplote. Vyplýva to z Ohmovho zákona. Pri voľbe senzoru teploty mohol byť zvolený aj senzor Pt100, ktorého vlastnosti sú identické akurát hodnoty odporov pri teplote sú 10-krát menšie. To znamená citlivosť senzoru Pt1000 je 3,85 Ω /°C a Pt100 0,385 Ω /°C, čiže so senzorom Pt1000 môže byť dosiahnuté vyššie rozlíšenie.



Obr.9: Prúdový zdroj

Napätie vstupujúce do ADC mikroprocesora môže byť v rozsahu cca 0–2,4V. Obvod pre meranie teploty je nastavený pre meranie teploty od 15°C do 45°C. Je to kvôli dosiahnutiu vyššej presnosti merania teploty. Na senzore Pt1000 tomu zodpovedajú hodnoty odporov od 1058,5Ω pri 15°C a 1174,7Ω pri 45°C. Pri prúdovom zdroji 1mA tomu zodpovedá napätie od 1,0585 – 1,1747V ktoré sa objaví na vývodoch senzora. Tým pádom by sa rozsah ADC stal nevyužitým a vyhodnocovanie by bolo komplikované. Z toho dôvodu je použitý obvod LT1215, ktorý napätie na vývodoch senzora transformuje na celý rozsah. Docielime to vhodným nastavením hodnôt odporov R13 a R19. Časť obvodu LT1215 v spodnej časti obr.10 spolu s napäťovou referenciou IC5 a deličom napätia tvoreného odpormi R13, R14 posunie napätie k nule. Druhá časť obvodu zasa posúva napätie k hornej hranici napätia, ktoré sa objaví na výstupe druhej časti obvodu LT1215.



Obr.10: Obvod pre zvýšenie rozsahu spracovaného napätia

5 Návrh PID regulátora

Pod návrhom regulačného obvodu rozumieme určenie jeho štruktúry a parametrov tak, aby vyhovoval určitým požiadavkám. Sú to hlavne stabilita a určitý stupeň bezpečnosti v stabilite, predpísaná presnosť regulácie v ustálenom režime a požadovaná kvalita prechodného procesu pri riadení a pri potláčaní porúch.

Ďalšou etapou návrhu je voľba členov regulačného obvodu, pri ktorej musíme rešpektovať napr. požiadavky na spoľahlivosť, pracovné prostredie, pracovné režimy a pod.

Pri návrhu regulačného obvodu potrebujeme poznať :

- vlastnosti riadeného systému,
- predpokladaný priebeh riadiacej veličiny,
- predpokladané priebehy poruchových veličín, a miesta ich vstupu do regulačného obvodu,
- obmedzenia akčných veličín,
- požiadavku na kvalitu riadenia,
- charakteristiky pôsobiacich šumov.

Regulovaný systém je možné určiť z nameranej prechodovej charakteristiky, ktorá je odozvou na jednotkový skok. Z prechodovej charakteristiky na obr.12 je možné určiť o aký systém sa jedná. Je vidieť podľa [7], že sa jedná o systém 2. rádu s dopravným oneskorením, ktorého charakteristická rovnica je

$$F(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^2} e^{-T_d s}, \quad (14)$$

kde

$$T_d = 1,937t_{0,33} - 0,93t_{0,7}, \quad (15)$$

$$T_p = 0,794.(t_{0,7} - t_{0,33}), \quad (16)$$

kde T_p je časová konštanta a T_d je dopravné oneskorenie systému.

Z rovníc (15) a (16) vyplýva, že systém na obr.12 je charakterizovaný prechodovou funkciou

$$G_p(s) = \frac{4,25}{(83,68s + 1)^2} e^{15,65s}, \quad (17)$$

a po z-transformácii [13] má tvar

$$G_p(z) = \frac{0,000108z^{-2}}{1 - 0,0239z^{-1} + 0,00014z^{-2}}. \quad (18)$$

5.1 Výpočet parametrov regulátora

5.1.1 Určenie konštánt t_n , t_u , K

Prechodová funkcia je odozva systému na jednotkový skok pri nulových začiatočných podmienkach. Označuje sa $y(t)$. Jej grafickým znázornením je prechodová charakteristika. Laplaceov obraz jednotkového skoku je

$$L\{1(t)\} = \frac{1}{s}. \quad (19)$$

Obraz prechodovej funkcie bude

$$Y(s) = L\{y(t)\} = F(s)\frac{1}{s}, \quad (20)$$

a prechodová funkcia môže byť vyjadrená ako

$$y(t) = L^{-1}\left\{F(s)\frac{1}{s}\right\}. \quad (21)$$

Pri danom zariadení sa jedná o systém druhého rádu

$$F(s) = \frac{b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (22)$$

Prechodová funkcia je vyjadrená v tvare

$$y(t) = K\left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2}e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2}e^{-t/T_2}\right), \quad (23)$$

kde K je zosilnenie a T_1 a T_2 časové konštanty systému. Zodpovedajúca prechodová charakteristika je znázornená na obr.11.

Zosilnenie K je možné určiť z ustálenej hodnoty prechodovej charakteristiky

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \frac{b_0}{a_0}. \quad (24)$$

Časové konštanty T_1 a T_2 sa dajú určiť na základe niektorých ďalších parametrov prechodovej charakteristiky obr.11. Vieme, že platí inflexný bod

$$y''(t_i) = 0. \quad (25)$$

Vychádzajúc z analyticky vyjadrenej prechodovej funkcie pre druhú deriváciu dostávame

$$y''(t) = \frac{K}{T_1 - T_2} \left(-\frac{1}{T_1} e^{-t/T_1} + \frac{1}{T_2} e^{-t/T_2} \right) \quad (26)$$

a

$$t_i = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (27)$$

Dotyčnica inflexným bodom bude opísaná vzťahom

$$y_d = \left[\frac{dy}{dt} \right]_{t=t_i} (t - t_i) + y(t_i) = \frac{K}{T_1} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}} (t - t_i) + y(t_i). \quad (28)$$

Z podmienky

$$y_d(t_u) = 0, \quad (29)$$

určíme parameter t_u nazývaný aj čas prietahu

$$t_u = t_i - \frac{T_1}{K} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}} y(t_i) \quad (30)$$

Ide o čas, ktorý vytína dotyčnica preložená inflexným bodom monotónnej prechodovej charakteristiky na časovej osi.

Podobne sa určí aj čas prechodu t_p , v ktorom dotyčnica pretína ustálenú hodnotu. Parameter t_p vypočítame na základe rovnosti

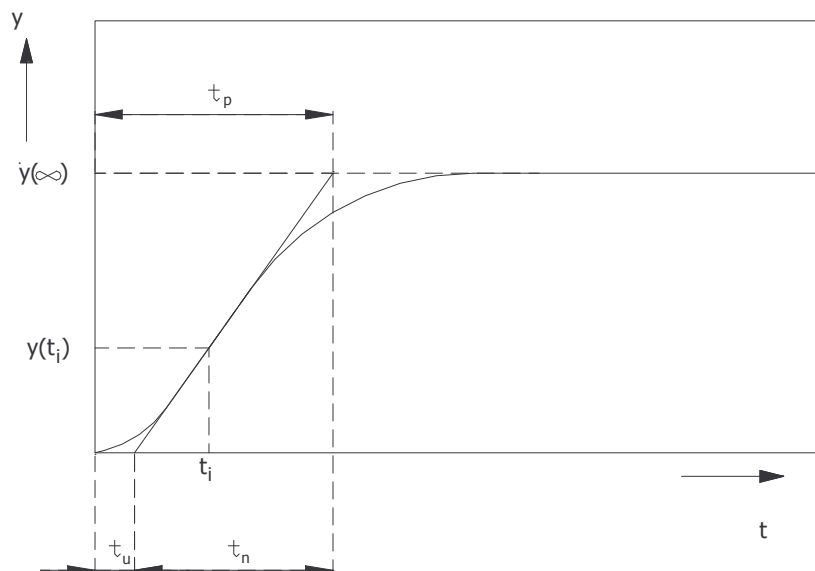
$$y_d(t_p) = K, \quad (31)$$

odkiaľ

$$t_p = t_i + \frac{T_1}{K} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}} (K - y(t_i)). \quad (32)$$

V súvislosti so zavedenými parametrami t_u a t_p sa zvykne zdefinovať parameter t_n , nazývaný aj čas nábehu monotónnej prechodovej charakteristiky a dá sa určiť ako

$$t_n = t_p - t_u = T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}}. \quad (33)$$



Obr.11: Prechodová charakteristika statickej sústavy 2. rádu s dotyčnicou v inflexnom bode[7]

5.1.2 Výpočet parametrov K_p , T_i , T_d

Vstupnými údajmi sú zosilnenie sústavy K , doba prietahu t_u a doba nábehu t_n . Ale treba pripomenúť, že sa jedná o experimentálnu metódu Ziegler- Nichols. Od štandardnej metódy Ziegler- Nichols sa líši algoritmom výpočtu. Tá využíva kritické hranice.

Z dostupných parametrov je možné vypočítať konštanty regulátora metódou Ziegler- Nichols podľa tab.2.

Typ regulátora	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} \cdot \frac{T_N}{T_U}$		
PI	$\frac{0,9}{K} \cdot \frac{T_N}{T_U}$	$3,33 \cdot T_U$	
PID	$\frac{1,2}{K} \cdot \frac{T_N}{T_U}$	$2 \cdot T_U$	$0,5 \cdot T_U$

Tab.2: Parametre regulátora pre metódu Ziegler-Nichols

5.1.3 Prepočet spojitého PID regulátora na diskretný PSD regulátor

Prenosová funkcia PID regulátora je

$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (34)$$

PSD resp. PID regulátory patria do skupiny regulátorov, u ktorých sa hľadajú optimálne parametre pri zadanej štruktúre regulátora. Parametre PSD regulátora je možné navrhovať priamo v diskretnéj oblasti na základe zvoleného kritéria kvality alebo predpísaním pólov, či postupným ladením na základe vybraných charakteristík odozvy regulačného obvodu – tento prístup je vhodný aj pre väčšie periódy vzorkovania. Druhý prístup, veľmi často používaný vychádza z prepočtu už navrhovaného spojitého PID regulátora na diskretný algoritmus. Výhodou tohoto prístupu je možnosť využiť všetky skúsenosti z návrhu PID regulátora. Výsledky sú však použiteľné len pre dostatočne malé periódy vzorkovania T .

Úlohou je realizácia PID regulátora číslicovým počítačom, tj. prepočet na diskretný PSD regulátor a stanovenie podmienok, za ktorých tento prepočet zodpovedá charakteru PID regulátora.

Majme ideálny PID regulátor, opísaný rovnicou (1). Pre malú periódu vzorkovania T možno rovnicu (1) diskretizovať na referenčnú rovnicu. Pritom integrál nahradíme sumou zodpovedajúcou obdĺžnikovej, resp. lichobežníkovej aproximácii a deriváciu diferenciou prvého rádu. Uvedenými operáciami dostaneme vzťahy :

a) pre obdĺžnikovú náhradu integrálu:

$$u(k) = K \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right], \quad (35)$$

b) pre lichobežníkovú náhradu integrálu:

$$u(k) = K \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \left(\frac{e(0) + e(k)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \right) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right]. \quad (36)$$

Vzťahy (35) a (36) predstavujú tzv. polohový algoritmus PSD regulátora. V polohovom algoritme je potrebné pri každom výpočte akčného zásahu počítať integračnú, resp. sumačnú S-zložku nanovo – zo všetkých predchádzajúcich hodnôt regulačnej odchýlky. Preto v prípade, že I-zložka resp. S-zložka je nenulová, z hľadiska algoritmickej je vhodnejší tzv. rýchlostný algoritmus, kde

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (37)$$

V ďalšom kroku sú vyjadrené $\Delta u(k)$ pre rovnice (35), resp. (36). Pre obdĺžnikovú náhradu dostávame:

$$u(k-1) = K \left[e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k-2} e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k-1) - e(k-2)) \right], \quad (38)$$

a odčítaním rovníc (35) a (38) dostaneme:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (39)$$

kde

$$\begin{aligned} q_0 &= K \left(1 + \frac{T_d}{T} \right), \\ q_1 &= -K \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} - \frac{T}{2T_i} \right), \\ q_2 &= K \frac{T_d}{T}. \end{aligned} \quad (40)$$

Analogicky pre lichobežníkovú metódu dostaneme:

$$\begin{aligned} q_0 &= K \left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{2T_i} \right), \\ q_1 &= -K \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} - \frac{T}{2T_i} \right), \end{aligned}$$

$$q_2 = K \frac{T_d}{T_0}. \quad (41)$$

Rýchlostný algoritmus PSD regulátora dostaneme z (37) a (39):

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (42)$$

pričom parametre q_0, q_1, q_2 sú určené vzťahom (40).

Prenosovú funkciu diskrétného PSD regulátora dostaneme z-transformáciou diferenčnej rovnice (42) a po jej úprave

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (43)$$

Podmienky ekvivalentnosti PSD a PID regulátorov sú teda

$$q_0 > 0; \quad q_1 < -q_0; \quad -(q_0 + q_1) < q_2 < q_0. \quad (44)$$

Navrhnuté zariadenie na základe zmeranej prechodovej charakteristiky vypočítalo parametre PID regulátora podľa tab.2 :

$$K_p = 42,86$$

$$T_i = 133,33$$

$$T_d = 33,33$$

Podľa (34) a vypočítaných parametrov je prenosová funkcia navrhnutého regulátora

$$G_R(s) = 42,86 \cdot \left(1 + \frac{1}{133,33s} + 33,33s\right). \quad (45)$$

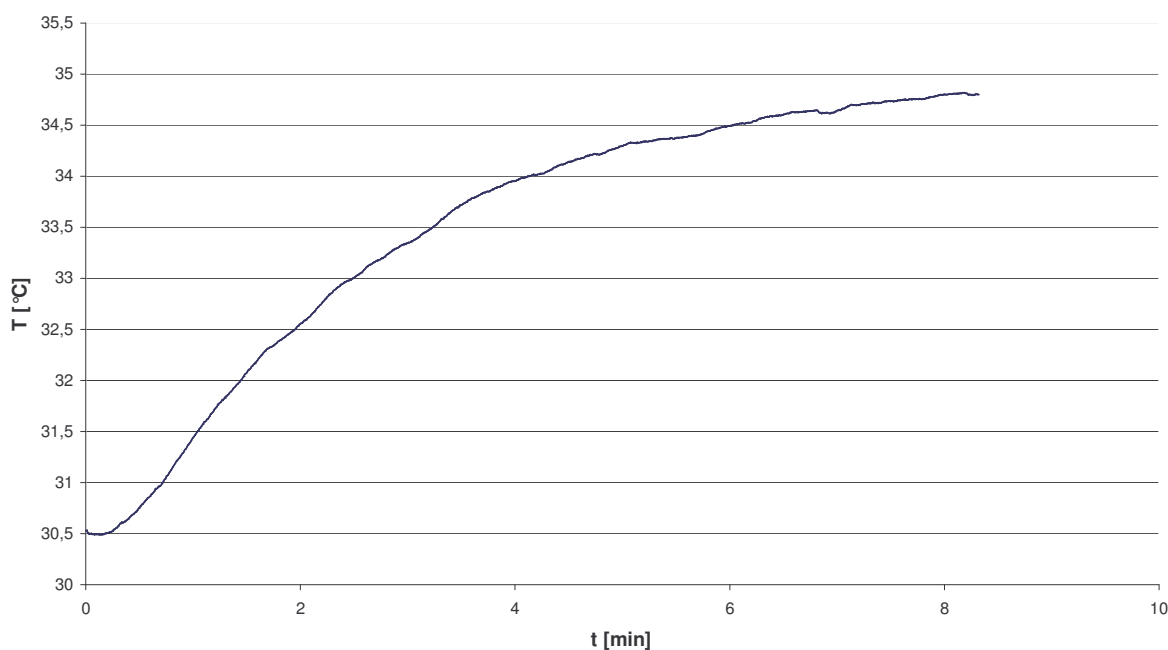
Pri zvolenej perióde vzorkovania $T = 0,2s$, použitím prepočtu obdĺžnikovej metódy PID regulátora na PSD a po výpočtoch podľa (40) je prenosová funkcia PSD regulátora

$$G_R(z) = \frac{7185,48 - 14328,03z^{-1} + 7185,63z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \quad (46)$$

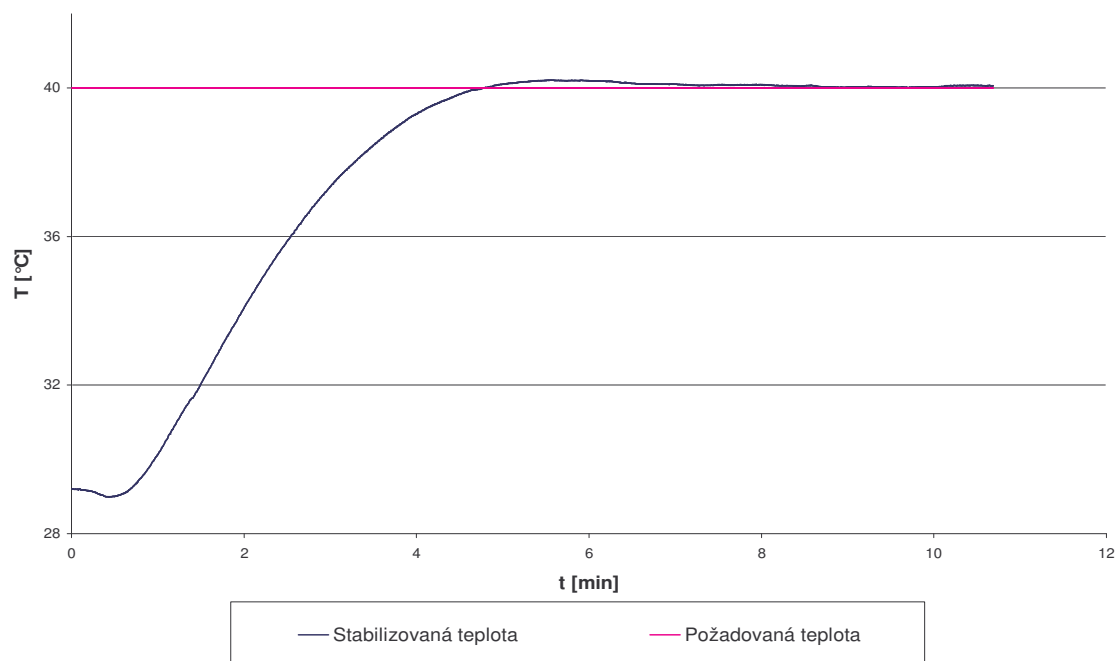
pričom sú splnené podmienky podľa (44).

6 Merania

Na základe vypočítaného regulátora, t.j. jeho prechodovej funkcie je možné vybrať si na akú teplotu chceme stabilizovať sústavu, v ktorej sa nachádza Peltierov článok. Pri meraniach bolo napájacie napätie nastavené na 7,5V a použitý bol zdroj Diametral P230 R31. Konštrukčne je sústava riešená tak, že na Peltierovom článku sú z oboch strán malé medenné chladiče (50 x 50 x 5 mm) a na jednom z chladičov je pripevnený teplotný senzor Pt1000. Prechodová charakteristika tohto systému s dopravným oneskorením je znázornená na obr.12. Softvér, ktorým bola zisťovaná ju pokladal za ustálenú. Je to odozva systému na jednotkový skok. Prvé merania prebiehali v priestoroch školy v laboratóriu, kde sa nachádzala teplotná komora CTS T-40/25, ktorá bola akurát v prevádzke. Pre tieto podmienky platia skôr spomenuté parametre regulátora $K_p=42,86$, $T_i=133,33$, $T_d=33,33$.



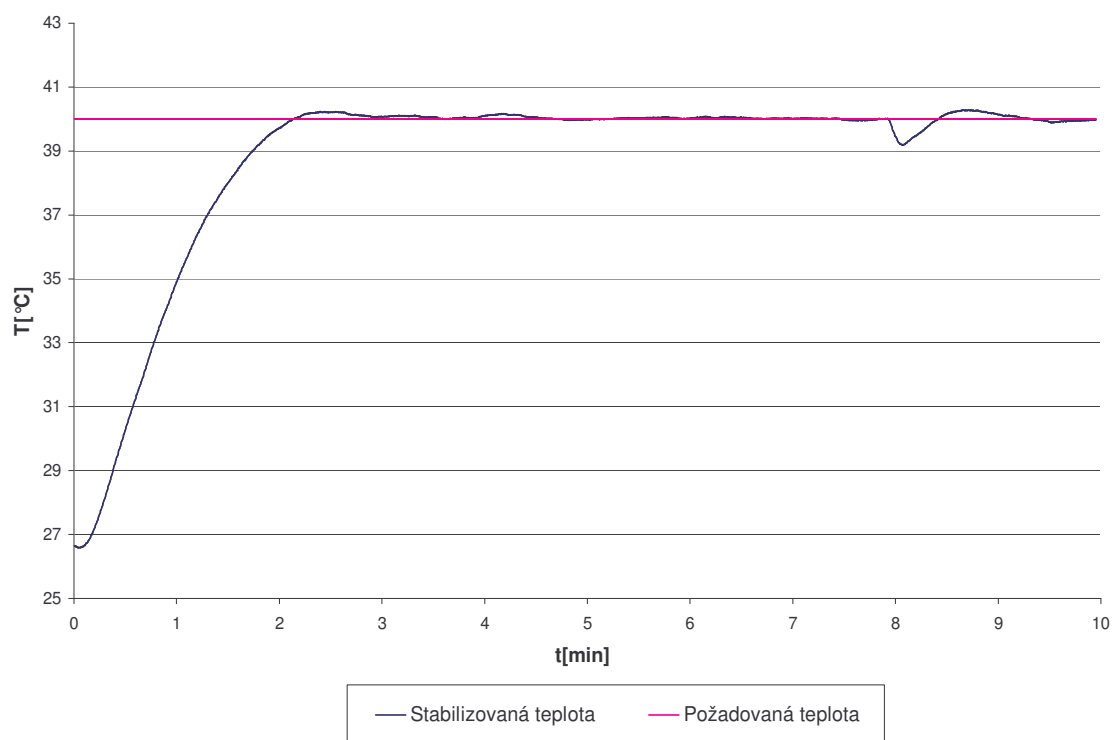
Obr.12: Prechodová charakteristika systému



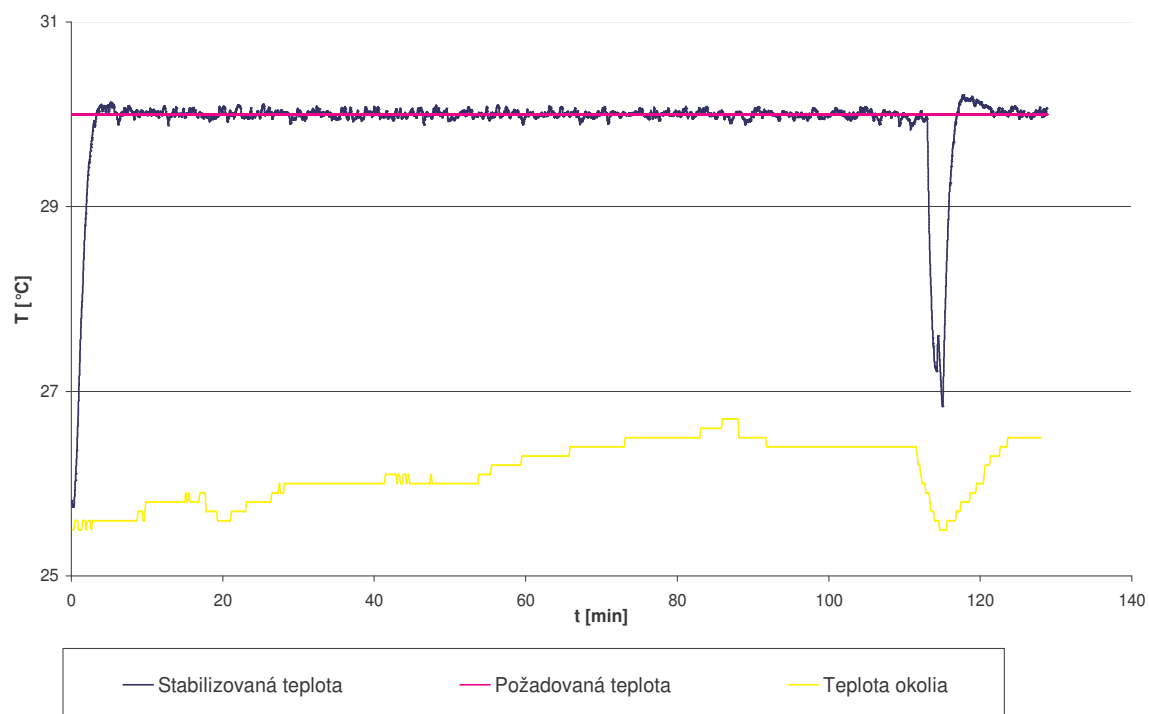
Obr.13: Stabilizácia na 40°C

Ako je vidieť na obr.13 regulátor sa dokázal ustáliť na požadovanej teplote približne za 10 minút.

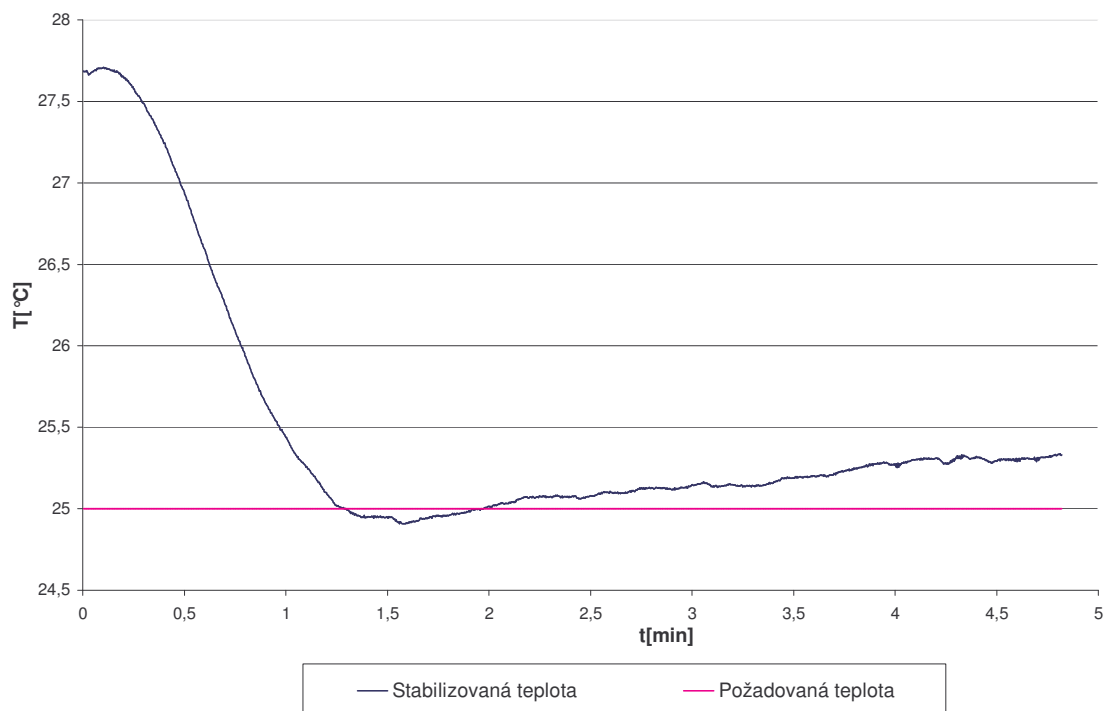
Dalšie merania boli prevedené mimo objektu školy. Parametre regulátora vyplývajúce z novej prechodovej charakteristiky sú $K_p=39,27$, $T_i=122,24$, $T_d=30,56$. Perióda vzorkovania T je tentoraz 0,5 s. Pri týchto meraniach boli skúšané pokusy o rozkmitanie sa sústavy jej ochladením najskôr približne o jeden stupeň pri kratšom čase stabilizácie. Pri druhom meraní je systém ponechaný na stabilizáciu teploty na 30°C dlhší časový interval so sledovaním teploty okolia, ktorá bola zaznamenávaná každých 10 sekúnd prístrojom Comet – typ D 0241, a jej vplyvu na navrhnutý regulátor. Taktiež v tomto meraní bola stabilizovaná sústava ochladená ale o teplotu približne 3°C. Stabilizovaná teplota sa opäť vrátila na hodnotu požadovanej.



Obr.14: Stabilizácia na teplotu 40°C s pokusom o rozkmitanie



Obr.15: Stabilizácia na teplotu 30°C so zobrazenou teplotou okolia



Obr.16: Ochladzovanie na 25°C

Na obr.16 prebiehalo ochladzovanie na 25°C. Je to približne teplota o 3°C menšia ako počiatočná teplota okolia. Zo začiatku regulátor stabilizoval teplotu na teplotu požadovanú, čo sa mu aj darilo, ale postupne sa teplota začala zdvíhať a stabilizátor sa javil nefunkčný. Toto zdvíhanie teploty nie je spôsobené zle navrhnutým regulátorom ale tým, že teplo z teplejšej strany Peltierovho článku nebolo dostatočne rýchlo odvádzané a začalo prenikať na chladnejšiu stranu.

7 Záver

V bakalárskej práci bol navrhnutý a realizovaný systém pre stabilizáciu teploty s Peltierovým článkom riadený mikrokontrolérom. Bola zmeraná prechodová charakteristika systému, prevedené merania so stabilizáciou teploty na hodnotu požadovanú. Pri teplote vyššej ako teplota okolia sa systém ustálil na žiadanej hodnote, pričom boli vyskúšané aj pokusy o jeho rozkmitanie. Navrhnutý regulátor ale zakaždým dokázal ustabilizovať teplotu a vrátil sa na nastavenú teplotu. Pri regulovaní na teplotu nižšiu ako teplotu okolia sa nedokázal ustáliť na žiadanej teplote, pretože na teplej strane článku nedochádzalo k dostatočnému odvedeniu tepla a to začalo prenikať cez Peltierov článok na druhú stranu. Pri stabilizovaní na teplotu nižšiu ako teplotu okolia je vhodné použiť väčší chladič, ktorý by vzniklé teplo z teplejšej strany stihol odviesť poprípade na chladič by musel byť pripevnený ventilátor, ktorý by ofukoval chladič. Jedným z najlepších spôsobov by bolo vodné chladenie.

Pri výpočte parametrov je najdôležitejšou a najťažšou úlohou stanovenie inflexného bodu prechodovej charakteristiky, od ktorého sa odvíja vypočítanie konštánt T_n , T_u , K a následný výpočet parametrov regulátora T_i , T_d , K_p . Na správne stanovenie inflexného bodu vplýva vhodne zvolená perióda vzorkovania, a minimalizovanie šumu, ktorý negatívne vplýva na systém.

8 Zoznam použitej literatúry

- [1] SILICON LABORATORIES: Full Speed USB Flash MCU Family, C8051F34x. [online]. 08/01/2006. [cit.11/22/2007]. Dostupné z WWW <http://www.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/USB/en/C8051F34x.pdf>
- [2] STMICROELECTRONICS: Step Down Switching Regulator, L5970. [online]. 09/01/2003. [cit.11/22/2007]. Dostupné z WWW <www.chipcatalog.com/ST/L5970.htm>
- [3] MICROCHIP: Microprocessor monitor, TC1232. [online]. 06/01/2005. [cit.11/22/2007]. Dostupné z WWW <ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21370c.pdf>
- [4] VRBA, R., LEGÁT, P., FUJCIK, L., HÁZE, J., KUČTA, R., MIKEL, B., SKOČDOPOLE, M. *Digitální obvody a mikroprocesory*. elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT Brno, 2003. s. 1-238. ISBN: MEL103.
- [5] ELECTRONIC ASSEMBLY: Display, EA DOGM162. [online]. 06/01/2007. [cit.11/15/2007]. Dostupné z WWW <www.lcd-module.de/deu/pdf/doma/dog-m.pdf>
- [6] PHILIPS SEMICONDUCTORS: Octal D-type Transparent Latch, 74HCT573. [online]. 06/01/2005. [cit.11/22/2007]. Dostupné z WWW <www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/7/4/H/C/74HCT573.shtml>
- [7] HUBA, M., HUBINSKÝ, P., ŽÁKOVÁ, K. *Teória systémov..* Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. s. 150-160. ISBN 80-227-1820-3.
- [8] HARSÁNYI, L., MURGAŠ, M., ROSINOVÁ, D., KOZÁKOVÁ, A. *Teória automatického riadenia..* Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1998. s. 1-216. ISBN 80-227-1098-9.
- [9] BIOLEK, D. Analogové elektronické obvody. 973kB. Laboratorní cvičení. Elektronické učební texty, 41 s., ÚMEL FEKT VUT Brno, 2003.
- [10] PHILIPS SEMICONDUCTORS: Remote 8-bit I/O Expander For I2C Bus, PCF8574T. [online]. 04/02/1997. [cit.11/15/2007]. Dostupné z WWW <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/18215/PHILIPS/PCF8574T.html>>

- [11] MOTOROLA: Complementary PNP Silicon Power Bipolar Transistor, MJL1302A. [online]. 04/02/1995. [cit.11/15/2007]. Dostupné z WWW <http://www.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/pdf_kor/4877/MOTOROLA/MJL1302A.html >
- [12] INTERNATIONAL RECTIFIER: HEXFET Power MOSFET, IRLIZ34N. [online]. 08/25/1997. [cit.11/15/2007]. Dostupné z WWW <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/L/I/IRLIZ34N.shtml>
- [13] KOZÁK, Š. Prednášky z predmetu Lineárne systémy. FEI STU Bratislava, 1997. Dostupné z WWW <http://www.kasr.elf.stuba.sk/old_site/predmety/ls/lispredn.html>
- [14] KAČALIAK, M.: Diplomová práca. Spínaný zdroj so sínusovým odberom prúdu. KEPM FEI TU Košice, 2003.

9 Zoznam príloh

Príloha 1	Riadenie systému pre stabilizáciu teploty
Príloha 2	Schéma pre výkonové prvky s meraním teploty

